

I Energie, Kraftwerksbau

Johann-Dietrich Wörner, Darmstadt

Bernhard Milow, Köln

Beton-Kalender 2011: Kraftwerke, Faserbeton

Herausgegeben von Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner

Copyright © 2011 Ernst & Sohn, Berlin

ISBN: 978-3-433-02954-1



1 Allgemeines

Die Entwicklung der Menschheit ist unmittelbar mit dem Bedarf an, beziehungsweise der Verfügbarkeit von Energie verbunden.

Aufgrund der Tatsache der Energieerhaltung ist es streng genommen falsch, von Energieverbrauch oder von Energieerzeugung zu sprechen, stattdessen geht es um die Wandlung einer Energieform in eine andere, sei es durch mechanische Arbeit, Induktion, Verbrennung oder andere chemische bzw. physikalische Vorgänge. Von den vielen unterschiedlichen Energieformen sind Wärme und Elektrizität im Zusammenhang mit Kraftwerksbau von besonderer Bedeutung: Wärme in verschiedenen Formen von Heizung bis hin zur Verbrennung in Dampfmaschinen und Verbrennungsmotoren war die Energieform, die die Industrialisierung maßgeblich voranbrachte, aber in zunehmendem Maße auch Fragen des Umweltschutzes stellte. Darüber hinaus ist der Transport von Wärme zwar prinzipiell möglich und wird z. B. bei Fernwärmeleitungen praktiziert, ist jedoch im Vergleich zur Elektrizität sehr aufwendig und verlustreich. Im Mittelpunkt der aktuellen Energiediskussion steht die Erzeugung und Verwendung elektrischen Stroms. Elektrizität nimmt eine zentrale Rolle ein, sei es bei der Beleuchtung, bei der Kommunikation, bei Klimageräten oder auch bei industriellen Prozessen. Selbst im Bereich der Mobilität, einer Thematik, in der fossile Ressourcen, insbesondere Öl und zunehmend auch Gas, bisher den Energiebedarf deckten, wird mit der Entwicklung elektrischer Antriebe zu Land, zu Wasser und sogar in der Luft ein neues Energiekapitel aufgeschlagen. Auch wenn die fossilen Rohstoffe, insbesondere Kohle, noch für einen relativ langen Zeitraum für die prognostizierte Nachfrage ausreichen, so wird die Forderung nach neuen Energiewandlungssystemen, insbesondere zur Erzeugung elektrischen Stroms, immer klarer. Der wesentliche Treiber für eine nachhaltige Energieversorgung ist weniger die Knappheit an Ressourcen, sondern in zunehmendem Maße die Klimaproblematik.

Der Beton-Kalender 2011 widmet sich daher insbesondere der Kraftwerkstechnik und dem Kraftwerksbau, die als Grundlage für die Verfügbarkeit von Elektrizität für ganz unterschiedliche Anwendungsbereiche gelten. Dieser Beitrag soll allgemeine Fragen der Energiepolitik und -technik beleuchten und somit die Basis für die technischen Beiträge dieses Beton-Kalenders legen.

2 Energiepolitik

Die Forderungen einer zukunftsorientierten Energiepolitik umfassen verschiedene Gesichtspunkte, die je nach individueller und politischer Positionierung mit verschiedenen Prioritäten versehen werden. Für die Realisierung einer nachhaltigen Entwicklung ist es essenziell, die verschiedenen Aspekte gleichzeitig in angemessener Weise zu berücksichtigen und nicht momentane Opportunitätsgedanken in den Vordergrund zu stellen.

Während in der Energieversorgung zunächst die Technik an sich und dann die Wirtschaftlichkeit im Vordergrund stand, entwickelte sich durch mehr Umweltschutzgedanken und das wachsende Bedürfnis nach sicherer, zuverlässiger Energieversorgung das Zieldreieck der Energieversorgung mit den Elementen Ökologie, Ökonomie und Versorgungssicherheit. Die Weiterentwicklung unserer Gesellschaft erfordert, zukünftig die soziale Komponente verstärkt zu berücksichtigen, sodass heute von einem Zielviereck gesprochen werden kann und muss (Bild 1). Ohne die Akzeptanz der Bevölkerung kann der dringend erforderliche Umbau der Energieversorgung hin zu einem nachhaltigen System nicht mit der erforderlichen Geschwindigkeit vorangetrieben werden.

Das Ziel einer zuverlässigen, sicheren Energieversorgung erfordert die Entwicklung entsprechender Techniken, die sowohl den eigentlichen Energiewandlungsprozess als auch die Anpassung des Energieangebots an den Bedarf bzw. die Anpassung des Bedarfs an das verfügbare Energieangebot beinhaltet. Hier spielen Energiespeicher eine zunehmende Rolle; die bisher übliche Unterscheidung nach Grundlast- und Spitzenlastkraftwerken verliert an Bedeutung. Ziel ist die Sicherstellung nachfragegerechter, sicherer Energieversorgung zu jeder Zeit. Zudem spielt auch der Aspekt der Krisensicherheit eine wichtige Rolle.

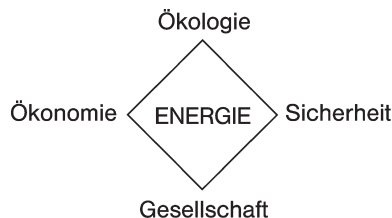


Bild 1. Viereck moderner Energiepolitik

Beton-Kalender 2011: Kraftwerke, Faserbeton

Herausgegeben von Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner

Copyright © 2011 Ernst & Sohn, Berlin

ISBN: 978-3-433-02954-1

Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung ist ein Gebot, das individuell wie gesamtgesellschaftlich von Bedeutung ist. Der Einzelne sieht diesen Aspekt häufig genug auf der persönlichen Ebene als einen zentralen Punkt an, da er die begrenzten persönlich verfügbaren finanziellen Mittel nicht für Energie, verstanden als „Grundbedürfnis“, ausgeben möchte. Auf der volkswirtschaftlichen Ebene ist offensichtlich, dass zumindest längerfristig eine Volkswirtschaft nur dann keinen Schaden nimmt, wenn Energie insgesamt so günstig angeboten werden kann, dass insbesondere die energieintensiven Unternehmen nicht einen anderen Standort im hinsichtlich der Energiekosten günstigeren Ausland wählen. Kurzfristig höhere Preise können durchaus sinnvoll sein, wenn damit sichergestellt wird, dass sich zukünftig daraus ein Vorteil (z. B. in wirtschaftlicher Hinsicht) ergibt. Die Markteinführung neuer, nachhaltiger Technologien ist ein Beispiel hierfür, wenn absehbar die Schwelle der Wirtschaftlichkeit dieser Technologien erreicht und überwunden werden kann. Zudem sind Energiekosten nur ein Standortfaktor neben vielen anderen.

Ökologische Ziele sind mittlerweile selbstverständlicher Bestandteil moderner Energiepolitik, auch wenn sie hin und wieder als Widerspruch zu den eher kurzfristigen, wirtschaftlichen Anforderungen gesehen werden. Hier hat die Übernahme des aus der Forstwirtschaft entnommenen Konzepts der Nachhaltigkeit eine Brücke gebaut, da aktuelle Entscheidungen auch zukünftige Entwicklungen antizipieren müssen. Die Antizipation beinhaltet die verschiedenen Effekte und erreicht so eine Balance zwischen kurzfristigen, finanziellen Perspektiven und langfristigen Folgen, auch für die Umwelt. Gerade die Berücksichtigung umweltbezogener Gesichtspunkte hat auch zu einer bedeutenden Entwicklung der Technik geführt.

Das Ziel Gesellschaftliche Akzeptanz hat als vorerst letzter Baustein erst seit kurzem seinen angemessenen Platz in der Energiepolitik gefunden. Lange Zeit wurde gerade im Bereich der Energie das Primat des Fachwissens als alleinentscheidend definiert. Mit zunehmender Aufmerksamkeit der Gesellschaft für Umweltfragen hat auch die Energiepolitik ihren Platz in der allgemeinen gesellschaftlichen Diskussion gefunden. Gerade die Akzeptanz von Energietechniken wird für die Zukunft immer wichtiger. Heutzutage sind weder neue Kohlekraftwerke, noch Windparks oder auch Pipelines, die beispielsweise für den Transport von CO₂ zu einer Speicherstätte erforderlich sind, ohne die Akzeptanz der Bevölkerung möglich. Aus diesem Grund ist es notwendig, neben den technischen Entwicklungen, ihren ökologischen und ökonomischen Konsequenzen und Randbedingungen auch der gesellschaftspolitischen Dimension Aufmerksamkeit zu schenken.

3 Heutige Energieversorgung

Bevor man über die zukünftige Energieversorgung diskutieren kann, ist eine Analyse der derzeitigen Situation der Energie national wie international erforderlich. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die spezifischen Primärenergieverbräuche pro Kopf in ausgewählten Regionen.

Die Darstellung belegt, dass weltweit starke Unterschiede im Primärenergieverbrauch festzustellen sind. Dabei ist der Lebensstandard nur einer von mehreren Faktoren, wie der Vergleich USA/EU beispielhaft belegt: Bei annähernd gleichem Lebensstandard unterscheidet sich der Verbrauch von Primärenergie um mehr als den Faktor 2. Deutschland liegt innerhalb der EU bei einem Vergleich des Primärenergieverbrauchs deutlich über dem Durchschnitt. Weitere Einflussparameter sind geografische, aber auch gesellschaftliche Aspekte. Eine genauere Betrachtung des Energiebedarfs und der zugehörigen Energiearten muss zwangsläufig regionalisiert erfolgen, da beispielsweise der Wärmeenergiebedarf ganz wesentlich von den klimatischen Bedingungen abhängt. Die entsprechende Aufteilung des Endenergiebedarfs, also die Verwendung der Energie, für die Bundesrepublik Deutschland ist in Tabelle 2 angegeben.

Allein diese Tabelle belegt die Bedeutung von den drei großen Anwendungssektoren Verkehr, Raum- und Prozesswärme. Beleuchtung ist demgegenüber eine Größenordnung kleiner. Politische Aktionen wie das Verbot der matten Glühlampen sind an sich genommen aus energetischer Sicht zwar sinnvoll, ihre Bedeutung wird aber stark relativiert, wenn man die Zahlen von Tabelle 2 zugrunde legt. Der Wert für Informations- und Kommunikationstechniken steigt mit zunehmender „Computerisierung“ unserer Gesellschaft rasch an. Die Computerindustrie hat die Bedeutung des Energiebedarfs jedoch bereits erkannt und entwickelt zunehmend auch Computersysteme mit besonderer Energieeffizienz. Für die

Tabelle 1. Primärenergieverbrauch pro Kopf 2006 (Quelle: US Energy Information Administration, Dez. 2008)

	GJ/Kopf
D	188
EU	154
USA	353
Afrika	17
China	59
Welt	76

Tabelle 2. Endenergiebedarf in Deutschland nach Energiearten 2007 [6] (auf der Basis von Daten der AGEb, des BDEW und der TU München/IfE)

	Prozent	PJ
Mechanische Energie	41,6	3571
– davon: Verkehr	29,8	2558
Raumwärme	26,1	2241
Prozesswärme	28,1	2412
Beleuchtung	2,4	206
IuK	1,8	155

PJ = Petajoule = 10^{15} Joule (Energie pro Leistungseinheit)

drei Hauptenergiebedarfsträger Verkehr, Prozesswärme und Hauswärme gilt es sowohl zentral wie dezentral, alle Anstrengungen zu unternehmen, um den Bedarf signifikant zu reduzieren. Dieses Gebot ist sowohl mit der Frage der beschränkten Ressourcen als auch mit der Wirkung auf unser Klima zu formulieren. Unabhängig von der jeweiligen Energienutzung werden auf dem Weg der Wandlung Stoffe (z. B. CO_2), Wärme, Lärm etc. emittiert, die sich negativ auf das Klima und die Umgebung auswirken. Die gesamte Kette vom Ausgangsstoff bis zur Energienutzung und darüber hinaus bedarf der intensiven Betrachtung.

Der Begriff des Energieverbrauchs ist im physikalischen Sinne nicht richtig, da Energie nicht verbraucht werden kann (Gesetz der Energieerhaltung), sondern nur entwertet. Verbraucht werden

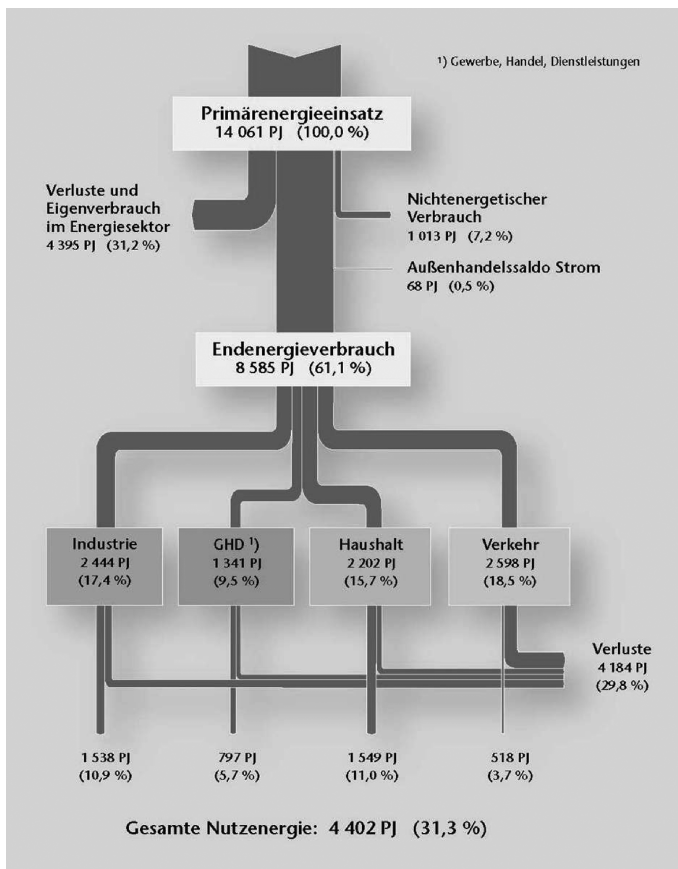


Bild 2. Energieflussdiagramm für die Bundesrepublik Deutschland [6]

Tabelle 3. Anteil fossiler und nuklearer Energieträger 2007
(Quelle: IEA-Webseite, <http://iea.org/stats/index.asp>)

	gesamt TWh	fossil TWh	Anteil fossil	nuklear TWh	Anteil nuklear
D	637	395	62 %	141	22 %
EU	3362	1865	55 %	935	28 %
USA	4349	3112	72 %	837	19 %
Afrika	618	505	82 %	11	2 %
China	3279	2721	83 %	62	2 %
Welt	19 855	13 469	68 %	2719	14 %

(Stromerzeugung aus Abfall nicht als fossil gerechnet)

die eingesetzten Energieträger (konventionelle Energieträger).

Eingesetzte Energieträger

- Konventionelle Energie
 - Erdöl
 - Erdgas
 - Stein- und Braunkohle
 - Kernenergie
- Erneuerbare Energie
 - Wasserkraft
 - Windenergie
 - Solarenergie
 - Biomasse
 - Geothermie.

Die Energiewandlung geschieht durch verschiedene Prozesse, die zentral oder dezentral organisiert sein können. Eine besondere Rolle kommt in der Stromversorgung derzeit (noch) den zentralen Anlagen zu, da diese zur Sicherung der zuverlässigen Energieversorgung auf eine lange Tradition zurückblicken können und viele Prozesse einen größenabhängigen Wirkungsgrad aufweisen. Tabelle 3 gibt den Anteil der verschiedenen zentralen Kraftwerkstypen in verschiedenen Regionen der Welt wieder.

Zunehmend werden bei der Stromerzeugung auch dezentrale Anlagen eingesetzt, während bisher lediglich die Wärmeerzeugung bis auf den Maßstab einzelner Haushalte hinab verbreitet war. Kleine Blockheizkraftwerke, basierend auf Otto- oder Dieselmotoren, haben ihren Weg bereits gefun-

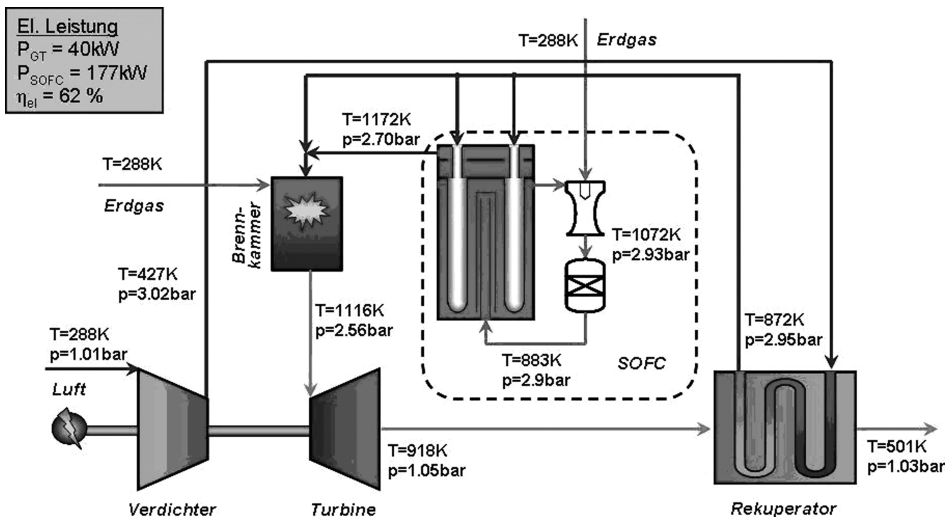


Bild 3. Hybridkraftwerk Brennstoffzelle – Mikrogasturbine

den, aktuelle Entwicklungen beschäftigen sich mit dem Einsatz der Brennstoffzelle und Hybridsystemen, bei der Brennstoffzellen und Mikrogastrurbinen zur Erreichung hoher Wirkungsgrade gekoppelt werden (Bild 3).

Im Weiteren werden eher die zentralen Systeme betrachtet, da hier die baulichen Anforderungen stärker im Mittelpunkt stehen.

4 Zukünftige Energieversorgung

Wie bereits dargestellt, ist der heutige Umgang mit Energie nicht nachhaltig. Hierzu tragen zwei wesentliche Aspekte bei: Einerseits werden globale Klimarisiken in Kauf genommen, die in ihren Auswirkungen schwer abzuschätzen sind, und andererseits werden endliche Ressourcen unwiederbringlich verbraucht. Es ist ein Gebot der Verantwortung gegenüber zukünftigen Generationen, die Energieversorgung und -nutzung so zu organisieren, dass wesentlich geringere Nachteile und Risiken damit verbunden sind.

Hierfür gibt es keine ideale Handlungslinie, mit der in kurzer Zeit alle energiepolitischen Ziele erreicht werden können. Uns steht weder ein „perfekter“ Kraftwerkstyp, noch ein „idealer“ Rohstofftyp noch eine hoch effiziente rechtliche oder ökonomische Maßnahme zur Verfügung, mit der das Energiesystem in kurzer Zeit nachhaltig gemacht werden kann. Es sind im Wesentlichen drei Handlungslinien, die parallel mit Konsequenz verfolgt werden müssen und die demnach auch die Energiepolitik auf dem Weg zur Nachhaltigkeit bestimmen werden:

- a) *Energiesparen* beim Endnutzer, privat, gewerblich und öffentlich, Wärme, Strom und Brennstoffe;
- b) *effiziente Energieumwandlung*, insbesondere bei der Strombereitstellung;
- c) *Steigerung des Anteils erneuerbarer Energien* in den Bereichen Strom, Wärme und Brennstoffe.

In allen drei Handlungslinien sind Aktivitäten der Bauwirtschaft erforderlich: Beim Energiesparen kommt es ganz wesentlich auf die baulichen Konzepte an, die von Dämmmaßnahmen bis zu Passivhaus- bzw. Plus-Energiehauskonzepten, sowie Klimahauskonzepten für Wohn-, Geschäfts- und Industriebauten reichen. Die Modernisierung der Energiewandlung und die Erhöhung der Nutzung erneuerbarer Energiequellen werden Kraftwerksneubauten in allen Leistungsklassen erfordern, aber auch umfassende Investitionen in die deutsche und europäische Energie-Infrastruktur. Ein Ausbau der Netze – Strom, aber auch Gas und Wärme – und insbesondere auch der Bau von Energiespeichern als zunehmend wichtigem Element des Energiesystems wird substanzielle bauliche Investitionen be-

dingen. Hiermit werden auch neue technische Anforderungen verbunden sein, die die Innovationskraft der Branche herausfordern.

Für Deutschland wurden Szenarien einer zukünftigen Energieversorgung vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Auftrag der Bundesregierung in einer Leitstudie entwickelt (Bild 4). Gegenstand der Untersuchung war die Frage, wie die gegenwärtig von der Politik bereits gesetzten energiepolitischen Ziele in Zukunft erreicht werden können.

Die Leitstudie ermittelt, wie das Ziel einer 80%igen CO₂-Reduktion bis 2050 in Deutschland erreicht werden kann und mit welchen strukturellen und ökonomischen Wirkungen hierbei zu rechnen ist. Das 80%-Ziel ergibt sich für alle Industriestaaten, wenn die weltweiten Emissionen so begrenzt werden sollen, dass die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf maximal 450 ppm ansteigt. Um dieses ehrgeizige Ziel zu erreichen, müssen alle Möglichkeiten entlang der drei Handlungslinien genutzt werden: Eine starke Steigerung der Nutzungseffizienz, insbesondere im Wärmebereich, geht einher mit einer weiteren deutlichen Steigerung der Umwandlungseffizienz. Der Primärenergieverbrauch kann so auf ein Niveau von 58 % des Wertes von 2005 gesenkt werden. Vom verbleibenden Bedarf an Strom können erneuerbare Energiequellen 2050 in einem intensiven Zusammenspiel mit Speichern und Lastmanagement etwa 85 % decken, zudem decken sie etwa die Hälfte des Wärmebedarfs und etwa 30 % des Bedarfs im Verkehr. Die relative Bedeutung von Strom gegenüber Wärme und Kraftstoffen wird deutlich zunehmen, was die Nutzung erneuerbarer Energiequellen erleichtert. Soweit noch Strom aus fossilen Energieträgern gewonnen wird, geschieht dies mit hohen Anteilen von Kraft-Wärme-Kopplung, also unter gleichzeitiger Erzeugung von Strom und Wärme und somit einer wesentlich besseren Ausnutzung der Brennstoffe. Bei den erneuerbaren Energien trägt in diesem Szenario der Ausbau der Windenergie gemeinsam mit der Solarenergie den größten Teil des Ausbaus, während die Bioenergie und die Geothermie mit kleineren Anteilen beitragen. Zur Solarenergie zählt auch ein relevanter Beitrag aus solarthermischen Kraftwerken in Südeuropa und Nordafrika.

Ökonomisch ermittelt die Studie die erforderlichen Investitionen wie auch die mittleren Bereitstellungskosten für Strom, Wärme und Kraftstoffe. Vor dem Hintergrund verschiedener Annahmen zur Preisentwicklung fossiler Energieträger können so die Differenzkosten ermittelt werden. Es zeigt sich, dass das Energiesystem dieser Struktur nach einer Phase von Mehrkosten bereits vor 2025 zu Einsparungen gegenüber einer Fortführung des Bisherigen führt und sich diese Einsparungen bis 2050 zu deutlichen Gesamtüberschüssen addieren.

Entwicklung der Energieversorgung in Deutschland

- Leitszenario 2009 -

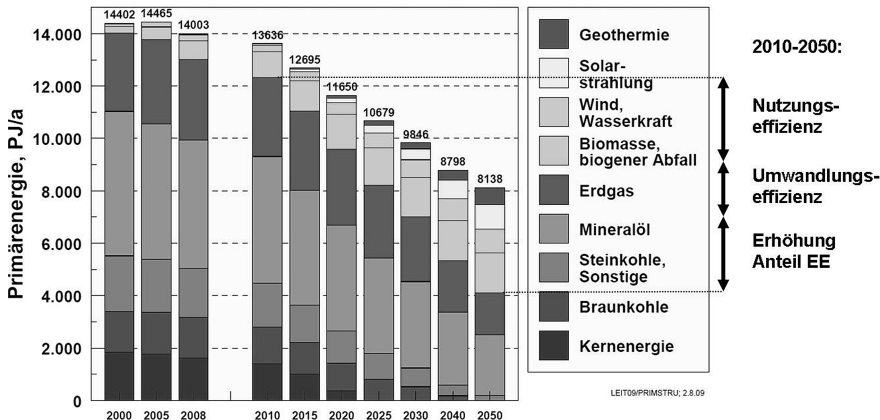


Bild 4. Leitstudie 2009 für Deutschland [1]

5 Kraftwerkstypen/ Energiewandlung

Allen Energiewandlungsverfahren ist gemeinsam, dass sie bauliche Anlagen benötigen, der jeweilige Aufwand ist jedoch sehr unterschiedlich.

Im Bereich der konventionellen Energiewandlung geht es insbesondere um den Kraftwerksbau einschließlich der erforderlichen „Nebenbauwerke“, wie Turbinengebäude, Schaltanlagengebäude, Umspannanlagen und Hochspannungsmasten.

Auch die erneuerbaren Energien erfordern Bauwerke besonderer Art, wie z. B. Windkraftanlagen auf dem Land und off-shore, Solarthermietürme und Spiegelkonstruktionen, Biogasanlagen und Speicherbauwerke zur bedarfsgerechten Deckung des Energiebedarfs bei weitgehend volatiler Energiebereitstellung, z. B. durch die Abhängigkeit von Wind und Sonne.

Wichtig ist zunächst eine sehr grobe Klassifizierung entsprechend der Wirkweisen der verschiedenen Kraftwerkstypen.

Unter **thermischen Kraftwerken** versteht man Systeme, bei denen meist über einen Dampfkreisprozess thermische Energie in einer Turbine erst in mechanische Energie (Drehbewegung) und schließlich mittels eines Generators in Strom umgewandelt wird. Die thermische Energie kann teilweise (Abwärmenutzung in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen) oder vollständig (wärmegeführte Heizkraftwerke) auch für thermische Prozesse genutzt werden (Bild 5).

Kraft-Wärme-Kopplung ist eine sinnvolle Maßnahme, um den Nutzungsgrad der eingesetzten Primärenergie deutlich zu erhöhen und so Primärenergie einzusparen. Alle Energiekonzepte für die Zukunft enthalten Kraft-Wärme-Kopplung als eine zentrale Komponente. Thermische Kraftwerke stellen heute den mit Abstand größten Anteil an der deutschen Kraftwerksleistung dar.

Zu den thermischen Kraftwerken gehören insbesondere:

1. Kohlekraftwerke
2. Gaskraftwerke
3. Ölkraftwerke
4. Motor-Blockheizkraftwerke (für Öl, Biodiesel, Erdgas oder Biogas)
5. Holzheizkraftwerke
6. Müllheizkraftwerke
7. Kernkraftwerke (Spaltung und zukünftig evtl. auch Fusion)
8. Geothermische Kraftwerke
9. Solarthermische Kraftwerke

Je nach Konstruktion muss bei thermischen Kraftwerken ein Teil der Ausgangsenergie beim Wandlungsprozess als „Restwärme“ abgeführt werden. Dazu werden z. B. auch Kühltürme eingesetzt.

Für die Kraftwerke 1. bis 6. sind es Verbrennungsvorgänge, d. h. chemische Oxidation, die als Wärmequelle dienen.

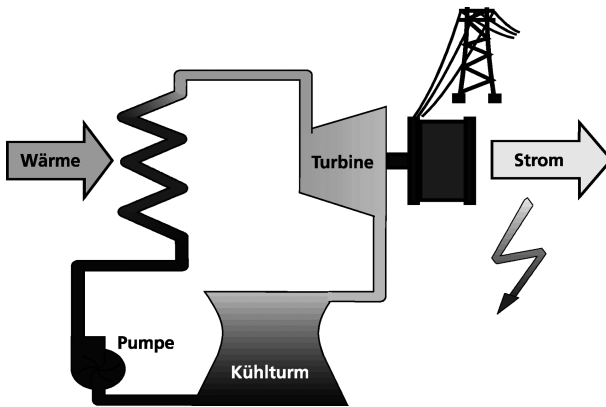


Bild 5. Prinzip thermischer Kraftwerke

Bei den **Kernkraftwerken** sind es Kernreaktionen, die auf der Grundlage der Kernspaltung bzw. Kernverschmelzung Wärme erzeugen.

Geothermische Kraftwerke nutzen die Wärme des Erdinneren, hervorgerufen durch Kernspaltungsvorgänge und gespeichert aus der Entstehung der Erde. Die Erde stellt ein enormes Wärmereservoir dar; die gespeicherte Energie beträgt ca. $2,8 \times 10^{24}$ kWh. Die Verfahren der Erdwärmenutzung sind insbesondere:

- Oberflächennahe Verfahren:
 - Erdwärmekollektoren
 - Erdwärmesonden
 - Energiepfähle
- Thermalwassernutzung/hydrothermale Systeme
- Hot-Dry-Rock-Systeme

Solarthermische Kraftwerke nutzen die Wärmestrahlung der Sonne, die durch Fusionsvorgänge im Sonneninneren entsteht. Um die Solarstrahlung besser ausnutzen zu können, werden sogenannte Konzentratoren, Spiegel oder Linsen verwendet. Sie haben die Aufgabe, die einfallende Strahlung zu sammeln und an den Kollektor weiterzuleiten.

Eine weitere Form der Energiewandlung aus chemisch gespeicherter Energie stellt die **Brennstoffzelle** dar. Eine Brennstoffzelle liefert unmittelbar elektrische Energie, in der Regel durch kontrollierte Oxidation von Wasserstoff.

Bei den **Wasserkraftwerken** wird potenzielle Energie, d. h. Lageenergie in elektrischen Strom gewandelt. Pumpspeicherkraftwerke sind eine spezielle Form von Wasserkraftwerken mit einem besonders großen Höhenunterschied, bei denen über die Verrichtung von Arbeit (elektrisches Hochpumpen von Wasser) Energie gespeichert und im Bedarfsfall wieder in Strom zurück-

gewandelt werden kann. Ähnliches gilt für **Druckluftspeicherkraftwerke**, bei denen Luft in unterirdischen Kavernen unter hohem Druck gespeichert wird.

Photovoltaik-Kraftwerke wandeln die Sonneneinstrahlung mittels Halbleitereffekt direkt in elektrische Energie um.

Bei den **Windkraftwerken** wird die in den bewegten Luftmassen vorhandene kinetische Energie in elektrischen Strom gewandelt oder z. B. zum direkten, mechanischen Antrieb von Pumpen verwendet. Während übliche Windkraftwerke den natürlichen Wind ausnutzen, wird bei Aufwindkraftwerken die Tatsache genutzt, dass heiße Luft nach oben steigt. Die Luft wird durch Sonneneinstrahlung unter entsprechenden Konstruktionen erhitzt und treibt dann in einem Turm eine entsprechende Turbine an.

Insbesondere solarthermische, Photovoltaik- und Windkraftwerke sind direkt abhängig von der Verfügbarkeit der jeweiligen Ressource Solarstrahlung oder Wind. Um diese Systeme in großem Umfang in Energieversorgungsstrukturen einzubinden, sind neben einer intelligenten Steuerung und Verteilung („Smart Grid“), wirkungsvolle Energiespeicher erforderlich. Energiespeicher können als chemische (z. B. Batterie, Wasserstoff), physikalische (z. B. Wärmespeicher) oder mechanische (z. B. Pumpspeicher) Konzepte realisiert werden.

6 Besondere Aspekte verschiedener Kraftwerkstypen

Energiewandlung findet in der Natur in vielfältigster Form statt: Von der Photosynthese, die mit einem relativ schlechten Wirkungsgrad arbeitet, da kaum evolutionärer Druck auf der Entwicklung höherer Effizienz lag, über die biologischen Vor-

gänge im Bereich der Fauna, elektrostatischer Entladung in der Atmosphäre bis hin zu den Kernspaltungsprozessen im Inneren unserer Erde und der Fusion von Wasserstoff zu Helium in der Sonne sind eine ganze Reihe von Energiewandlungsverfahren in der Natur zu beobachten. Eine Umsetzung in die „künstliche“, das soll heißen vom Menschen gezielt eingesetzte Technik ist nicht als „technische Homöopathie“ realisierbar, sondern erfordert ein Denken in Szenarien, Risiken, Konsequenzen. Diese pauschale Aussage gilt bei den verschiedenen Verfahren mit unterschiedlicher Intensität und unterschiedlichen Erfolgsaussichten: Während man den Prozess der Photosynthese technisch sicherlich zu deutlich höheren Wirkungsgraden als die Natur bringen kann, ist die Frage, ob die Fusion, die in den Sonnen seit Milliarden Jahren offensichtlich hervorragend funktioniert, auch im „kleinen Maßstab“ technisch umgesetzt werden kann, noch nicht endgültig geklärt. Die Forschungsarbeiten zur Realisierung eines Fusionsreaktors laufen weltweit auf Hochtouren und versprechen in ca. 50 Jahren den technischen Durchbruch für ein wirtschaftlich arbeitendes Kraftwerk erreichen zu können. Die Vorstellung, die Energiewandlung der Sonne im Kraftwerksmaßstab zu realisieren, ist Motivation für erhebliche Forschungsinvestitionen.

Bei Kernkraftwerken konventioneller und zukünftiger Bauarten kommt der Sicherheit wegen des Gefahrenpotenzials nuklearer Brennstoffe und Reaktionen und dem damit verbundenen Strahlenpotenzial besondere Bedeutung zu: Sowohl beim Kraftwerk selbst als auch beim Transport und bei der Lagerung der Kernbrennstoffe bedarf es besonderer Maßnahmen, um das technische Risiko, verstanden als Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit eines Bauteilversagens mit dem im Falle eines Schadens zu erwartenden Schadensumfang, so zu begrenzen, dass die technischen und gesellschaftlichen Erwartungen erfüllt werden. Die vergangenen 50 Jahre haben die Chancen, aber auch manche Risiken der friedlichen Nutzung der Kernenergie gezeigt.

Insbesondere die Tatsache, dass bei einem entsprechenden Unfall ein sehr großes Schadensmaß erwartet werden muss, führt bei Kernkraftwerken zu besonderen Sicherheitsüberlegungen, die zwar in erster Linie die Anlagentechnik betreffen, aber auch auf die bauliche Durchbildung erheblichen Einfluss haben, wenn z. B. Flugzeugabsturz oder Kernschmelze zu postulieren sind. Immer wieder wurden und werden auch Anstrengungen unternommen, um inhärent sichere Kernkraftwerke zu entwickeln. Ein Schritt zur Gewährleistung inhärenter Sicherheit ist der negative Dampfblasenkoeffizient von Leichtwasserreaktoren, bei denen das Wasser sowohl der Wärmeübertrager als auch der Moderator ist: Bei Überhitzung

reduziert sich die Moderatorwirkung durch das Verdampfen, die Kettenreaktion wird hierdurch gebremst. Auch bei zukünftigen Fusionsreaktoren sind derartige Sicherheitselemente integriert.

Aber auch andere Energiewandlungsmethoden sind hinsichtlich ihrer Konsequenzen besonders zu beachten: Kohle- und Ölkraftwerke stoßen nicht nur bisher in der Ökomasse gespeichertes CO₂ aus, sondern verbrennen Rohstoffe, die auch für andere Anwendungen, z. B. zur Herstellung von Kunststoffen, von Bedeutung sind. Bei den Photovoltaikanlagen wird auf die Umweltrelevanz des Herstellungsprozesses und der verwendeten Materialien hingewiesen. An Windkraftwerken wird die optische Beeinträchtigung kritisiert, ein negativer Einfluss auf das Mikroklima ist bei dem bisherigen Umfang an Kraftwerken wohl auszuschließen. Die Argumentation und Suche nach negativen Folgen kann auf alle Kraftwerkstypen ausgedehnt werden, darf jedoch nicht als Pauschalkritik an der Technisierung unserer Gesellschaft, sondern als Aufruf zur gründlichen, systemischen Betrachtung aller Wandlungsformen verstanden werden.

Der Mensch, als Teil der Natur, verändert die Welt, so wie die Natur schon seit Entstehung der Erde eine ständige Veränderung realisiert hat. Diese Tatsache ist aber kein Freibrief, sondern Forderung nach verantwortlichem Handeln zur Absicherung des Lebensraums auf unserm Planeten. Betrachtet man die dünne Hülle um die Erde, in der für uns Leben ohne technische Hilfe problemlos möglich ist (weniger als 10 km, das entspricht ca. 1,6 ‰ des Erdradius), und berücksichtigt das fragile Gleichgewicht unserer Atmosphäre (allein die Neigung der Erdachse von 23,44 Grad entscheidet über Sommer und Winter), wird schnell klar, wie komplex die Gesamtaufgabe ist. Die Fragilität des Gesamtsystems kann auch am Gehalt von CO₂ in der Atemluft abgelesen werden: Der Gehalt beträgt lediglich 0,039 %, zu Beginn der Industrialisierung lag er noch bei 0,028 %. Die Veränderung ist, absolut gesehen, sehr gering, hat jedoch schon jetzt die Bedeutung anthropogener Einflüsse eindrucksvoll demonstriert.

7 Bauwerke und Konstruktionen

Aufbauend auf der Vielfalt verschiedener Kraftwerkstypen ergibt sich eine sehr große Anzahl zum Teil sehr unterschiedlicher baulicher Konstruktionen, um den besonderen Anforderungen gerecht zu werden.

Besondere Bauwerke des Kraftwerksbaus sind z. B.

- Kesselgebäude (Kohle, Öl, Kernenergie),
- Turmbauwerke (konzentrierende Solar-energieanlagen, Abluftkamine),

- Kühltürme (thermische Kraftwerke),
- Kühlwassereinlaufbauwerke,
- Turbinengebäude,
- Druckspeicher,
- Druckschacht und Druckleitungen,
- thermische Speicher,
- Tanks (Wasser, Öl, Gas, Wasserstoff),
- Rohrleitungen,
- Speicherbecken,
- Wehr- und Sperrenbauwerke (Laufwasserkraftwerke, Gezeitenkraftwerke).

Kesselgebäude (Kohle, Gas, Öl, Kernenergie)

Die Kesselgebäude für Kohle-, Gas- und Ölkraftwerke bestehen in der Regel aus Stahlbeton- und Stahlkonstruktionen. Die Höhe variiert je nach Leistung und beträgt bis 80 m. Die Konstruktionen sind im Wesentlichen von der Anlagentechnik dominiert, die durch die zahlreichen Rohrleitungen gekennzeichnet ist. Die Hülle der Kesselhäuser bilden heute in der Regel mit Trapezblech verkleidete Stahlblechkassetten, die die Installation der Anlagentechnik ermöglichen. Im Sockelbereich werden Fertigbetonteile eingesetzt (Bild 6).

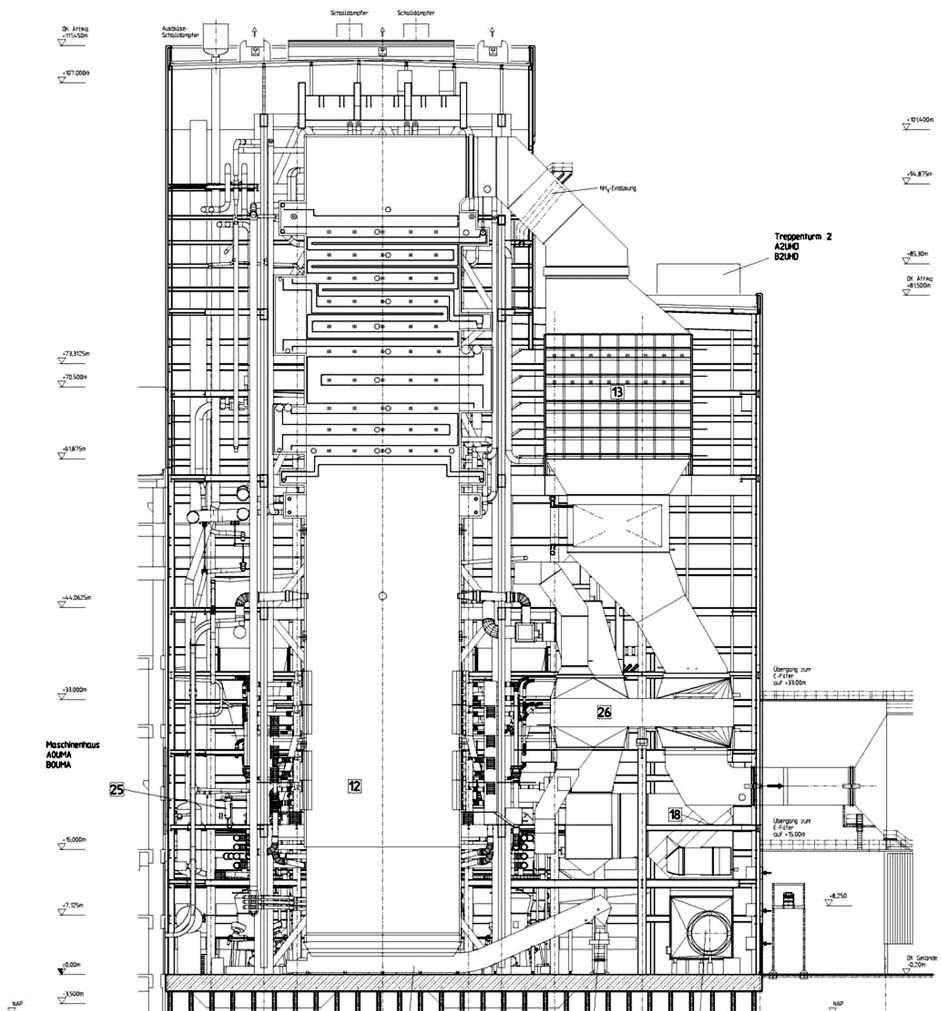


Bild 6. Kesselgebäude Kohlekraftwerk (Quelle: RWE)

Bei Kernkraftwerken unterscheidet man verschiedene Bauarten – im Wesentlichen werden heute weltweit Druckwasserreaktoren und Siedewasserreaktoren eingesetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Technik der beiden Reaktortypen sind auch die Konstruktionen unterschiedlich. Von zentraler Bedeutung sind neben den Anforderungen der Steuerung durch sog. Steuerstäbe, die von oben oder unten in das Reaktordruckgefäß eingeführt werden und dadurch die Gesamtkonstruktion beeinflussen, die Bemühungen, einen sicheren Einschluss auch für extreme Situationen zu gewährleisten. Unmittelbar um das Reaktordruckgefäß sind massive Stahlbetonwände als biologischer Schild angeordnet. Zur sicheren Beherrschung von hohen Innendrüken wurde bei den großen deutschen Druckwasserreaktoren ein kugelförmiges Stahlcontainment errichtet. Den Abschluss nach außen bildet eine Stahlbetonhülle, die insbesondere auch extremen Einwirkungen von außen, wie z. B. Flugzeugabsturz standhalten soll. Diese Hülle hat eine Wanddicke von bis zu 2 m (Bild 7).

Die internen Anlagen werden durch entsprechende Befestigungssysteme an den verschiedenen Stahlbetonbauteilen verankert. Zwischen der Stahlkugel und der äußeren Betonhülle ist bei den Druckwasserreaktoren, die in der Bundesrepublik gebaut wurden, ein Zwischenraum angeordnet, der mit einem permanenten Unterdruck beaufschlagt wird. In der DDR wurde zuletzt eine Verbundbauweise entwickelt, bei der die

Stahlhülle und die Stahlbetonkonstruktion miteinander durch Dübel fest verbunden wurden. Besondere Aufmerksamkeit muss den Rohrleitungen etc. gewidmet werden, die die Stahlkugel und die äußere Hülle durchdringen, um z. B. den Heißdampf zum Turbinengebäude zu befördern. In diese Kategorie gehören auch die verschiedenen Schleusensysteme, die für Personen und Maschinenteile die möglichst emissionsfreie Verbindung zwischen Innen und Außen gewährleisten.

Allen Kessel- und Reaktorgebäude ist gemein, dass der Wartung und dem Austausch von Maschinenbauteilen schon bei der Errichtung große Bedeutung zugemessen wird, Krankonstruktionen etc. sind daher selbstverständlich.

Turmbauwerke (Konzentrierende Solarenergieanlagen, Abluftkammine)

Nicht nur die Systeme der konzentrierenden Solarkraftwerke, sondern auch die Gas-, Öl- und Kohlekraftwerke und auch die Kernkraftwerke benötigen turmartige Bauwerke, die unterschiedlichen Zwecken dienen. Während bei Solarkraftwerken die Türme die „Receiver“ beherbergen, in denen die konzentrierte Solarstrahlung zur Erhitzung von Wasser oder zur Unterstützung chemischer Reaktionen genutzt wird (Bild 8), dienen die turmartigen Bauwerke bei Gas-, Öl-, Kohle- und Kernkraftwerken der gezielten Abgabe von Rauchgasen oder Abluft. Mit zunehmenden ökologischen Anforderungen werden immer weniger giftige

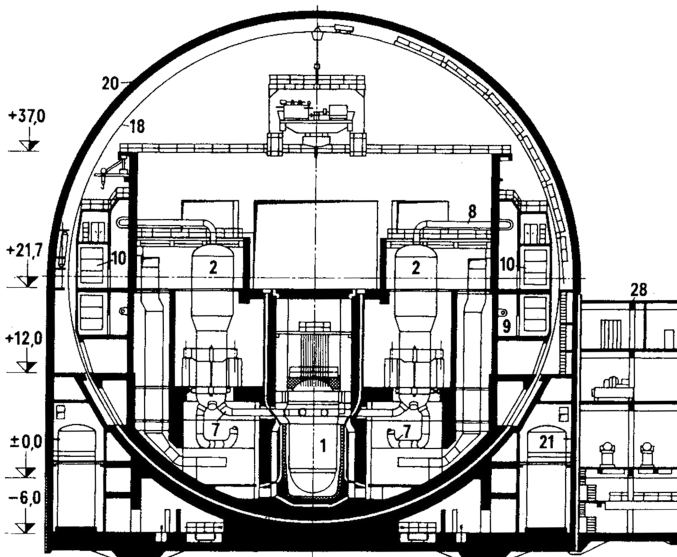


Bild 7. Reaktorgebäude eines Druckwasserreaktors – Beispiel (Quelle: RWE)



Bild 8. Turm eines Solarkraftwerks (Plataforma Solar de Almería)

oder belastete Gase emittiert, wodurch auch die Bedeutung der Kamine zurückgegangen ist.

Kühltürme (thermische Kraftwerke)

Die thermischen Kraftwerke bedürfen zur Gewährleistung eines Kreisprozesses der Abführung von Restwärme nach der Beaufschlagung der Turbinen. Diese Abwärme kann zum gewissen Teil als Fernwärme genutzt oder durch unmittelbare Nutzung eines Flusses abgeführt werden. Beiden Methoden sind je nach Situation, z. B. maximal zulässige Erwärmung des Flusswassers, enge Grenzen gesetzt, sodass man schon früh spezielle Kühltürme entwickelt und gebaut hat. Die modernen Naturzugkühltürme sind bis 200 m hoch und bestehen aus einer dünnen, doppeltgekrümmten Stahlbetonschale. (Eine Sonderkonstruktion war der Seilnetzkühlturm des Hochtemperaturreaktors in Schmelhausen). Die Wanddicke nimmt von unten nach oben ab, am oberen Ende ist ein Versteifungsring ausgeführt, der lokales Beulen der Schale verhindert (Bild 9). In den Kohlekraftwerken wird der Kühlturm häufig auch im Zusammenhang mit der Abgasreinigung zur Emission der Rauchgase genutzt.

Kühlwassereinlaufbauwerke

Die Nutzung von natürlichen Gewässern zur Kühlung erfordert spezielle Einlaufbauwerke, die mehrere Funktionen erfüllen müssen. Zentraler Punkt ist die sichere Aufnahme und Weiterleitung des Wassers, auch wenn im Gewässer eventuell Treibmaterial vorhanden ist. Die Konstruktion aus Stahlbeton ist strömungstechnisch optimiert (Bild 10).

Turbinengebäude

Bei thermischen Kraftwerken wird der im Kessel bzw. Reaktorgebäude, Solarturm oder anderem System erzeugte Dampf genutzt, um über Turbinen in kinetische Energie und schließlich durch Generatoren in Elektrizität gewandelt zu werden.

Je nach Größe sind die dafür erforderlichen baulichen Maßnahmen sehr unterschiedlich:

- Bei Windkraftwerken ist der Generator in der Regel integraler Bestandteil der Konstruktion und direkt an die Windräder über ein Getriebe gekoppelt.
- Bei Wasserkraftwerken ergibt sich die Anordnung der Turbinen unmittelbar aus der Geografie, das Turbinengebäude ist in der Regel Teil der Gesamtkonstruktion.
- Bei Kernkraftwerken werden die Turbinen und Generatoren in speziellen Turbinengebäuden untergebracht.

Liegt der Schwerpunkt zunächst in der Sicherstellung der Funktion und sich daraus ableitenden Strukturen, z. B. Turbinentisch, so sind je nach Bauart des Kraftwerks weitere Aspekte zu beachten. Beispielsweise werden die Turbinen von Siedewasserreaktoren mit dem Dampf beaufschlagt, der in unmittelbarem Kontakt mit den Brennelementen steht. Daraus ergeben sich zusätzliche Anforderungen des Strahlenschutzes. Auch dem Thema Berstschutz kommt bei größeren Anlagen eine besondere Bedeutung zu, um im Falle eines Versagens das Schadensausmaß zu begrenzen. Das Äußere eines Turbinengebäudes ist ein „unspektakuläres“ Stahlbetonbauwerk, das einer Hallenkonstruktion entspricht. Für Wartungsarbeiten werden Krankonstruktionen eingeplant.

Druckspeicher

Unter Druckspeichern werden sehr unterschiedliche Konstruktionen zusammengefasst: Da sind auf der einen Seite die speziellen Druckspeicher, die Teil des Kreislaufs bei einem Druckwasserreaktor sind und kurzfristige Druckschwankungen ausgleichen und auf der anderen Seite Einrichtungen, die als temporäre Speicher bei volatilen Energiewandlungsprozessen eingesetzt werden. Druckspeicher der ersten Gattung werden üblicherweise als Stahlbehälter ausgeführt, während bei der zweiten Art verschiedene Bauweisen bis hin zur Nutzung unterirdischer Hohlräume zur Ausführung kommen.

Druckschacht und Druckleitungen

Insbesondere bei den Wasserkraftwerken müssen größere Volumina unter Druck transportiert werden. Dazu werden bauliche Anlagen erforderlich, die neben den Druckverhältnissen auch den besonderen Anforderungen der Dauerhaftigkeit entsprechen müssen.

Der Triebwasserweg bei Wasserkraftwerken kann als ein offenes Gerinne, ein Freispiegel- oder Druckstollen, eine Freispiegel- oder Druckrohrleitung ausgebildet werden. Der Querschnitt wird nach hydraulischen, bautechnisch-ökonomischen sowie eingeschränkt auch ökologischen Kriterien

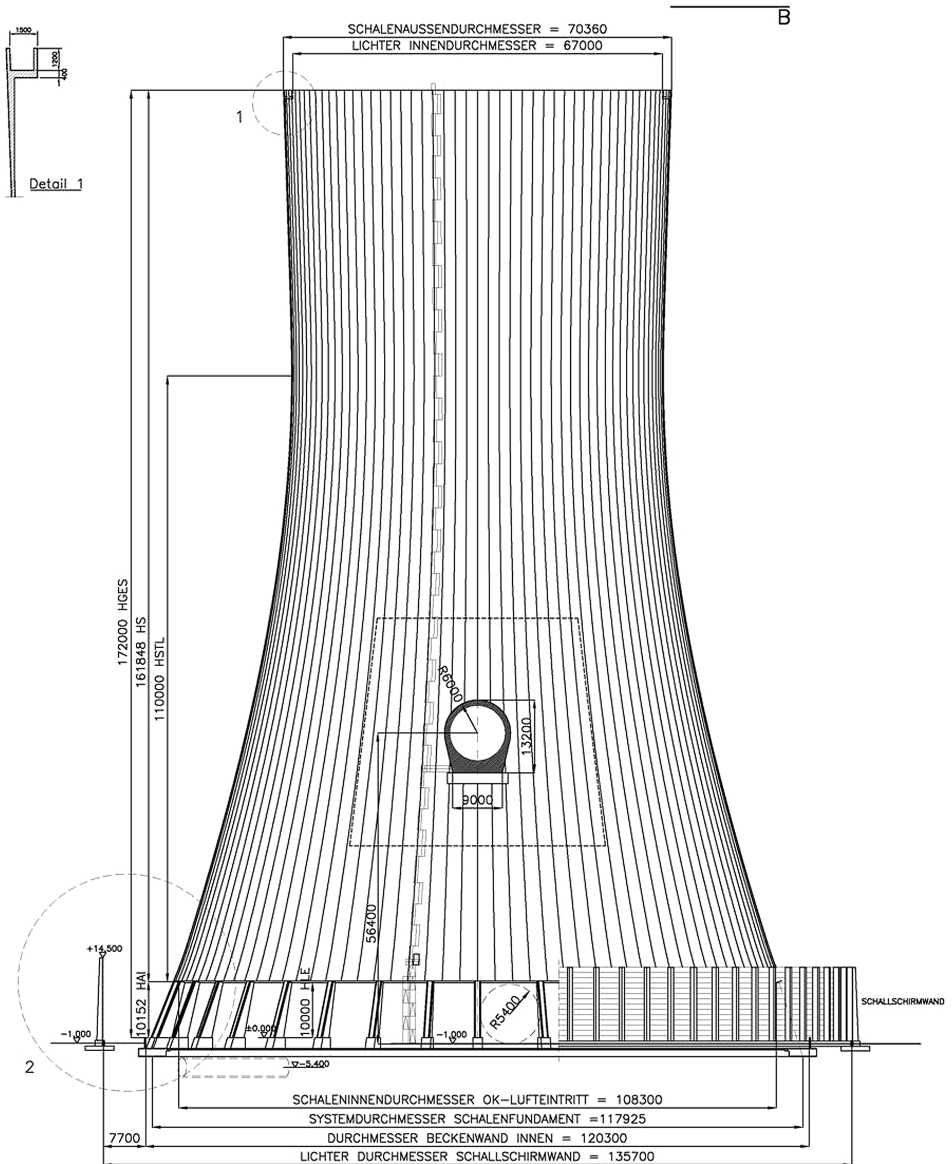


Bild 9. Naturzugkühlturm – Beispiel (Quelle: RWE)

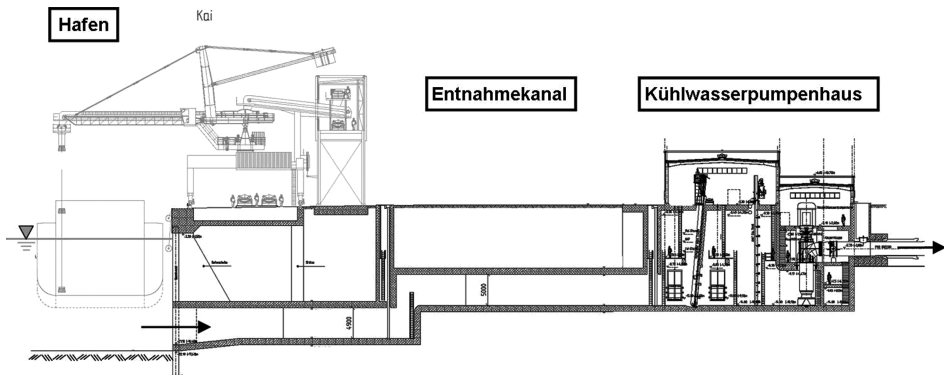


Bild 10. Einlaufbauwerk – Beispiel (Quelle: RWE)

festgelegt. Das Wasser wird häufig in Druckrohrleitungen zum Turbinenhaus geführt. Druckrohrleitungen können in Stahl, Stahl- und Spannbeton, GFK, Kunststoff und Holz hergestellt werden. Sofern die örtlichen Gegebenheiten es ermöglichen, werden die Druckleitungen bei Anlagen im Gebirge direkt im Fels ohne zusätzliche Auskleidung ausgeführt.

Thermische Speicher

Ähnlich wie bei den Druckspeichern für volatile Energiewandlungsprozesse dienen thermische Speicher der Bevorratung von Energie bis zur bedarfsgerechten Weiterleitung. Ein typisches Beispiel sind die thermischen Speicher in Verbindung mit Solarenergie. Dabei wird die Sonneneinstrahlung nur zu einem Teil direkt in elektrische Energie gewandelt, der Rest wird thermisch gespeichert. Neben der rein thermischen Energiespeicherung werden auch energieintensive Phasenwechsel zur effizienten Speicherung genutzt. Als thermische Speicher kommen sowohl thermisch isolierte Tanks mit entsprechender Füllung (z. B. Sole) oder auch Massivspeicher aus Beton zur Anwendung.

Tanks (Wasser, Öl, Gas, Wasserstoff)

Tanks/Behälter spielen im Kraftwerksbau vor allem als Speicher für flüssige oder gasförmige Stoffe eine wichtige Rolle. Primär handelt es sich um Schalentragwerke, meistens um Rotationschalen. Die vielfach aus Kreiszylindern und/oder Kegelschalen zusammengesetzten Tragwerke müssen auf ihre Wechselwirkung zwischen dem Behälterinhalt und dem Behälterbaustoff speziell betrachtet werden.

Tanks/Behälter kommen im Kraftwerksbau in ganz unterschiedlichen Anwendungen und Größen zum Einsatz. Die Anwendungsbreite reicht

vom Kraftstoffspeicher für Notstromaggregate bis zur Speicherung von Wasserstoff als im Kraftwerk durch Elektrolyse oder thermochemischer Verfahren gewonnenen Energieträger. In konventionellen Kraftwerken werden Wassertanks zur Sicherstellung des Betriebs erforderlich, Kernkraftwerke verfügen über Wassertanks, um auch im Falle eines Lecks die Wärme über einen bestimmten Zeitraum sicher abführen zu können (Notspeisung).

Die Bewertung der Behälterbaustoffe kann mit den wichtigsten drei Funktionen erfolgen:

- Gebrauchstauglichkeit, insbesondere Dichtheit,
- Tragsicherheit,
- Bauphysik, insbesondere Dämmwirkung.

Bei Ausführungen aus Stahlbeton/Spannbeton unterscheidet man insbesondere

- Mehrschichtsysteme: Schwarze Wanne, die Dichtheit wird durch eine Dichtschicht (Beschichtung, Liner o. Ä.) sichergestellt.
- Einschichtsysteme: Weiße Wanne, die Undurchlässigkeit wird durch den Beton selbst realisiert.

Rohrleitungen

Innerhalb aller Kraftwerke sind Rohrleitungen zum Transport verschiedener Medien von zentraler Bedeutung: Öl, Gas, Wasser unterschiedlicher Temperatur und unterschiedlichen Drucks werden in Rohrleitungen transportiert. Die Rohrleitungen werden meist aus Metall – Stahl oder Edelstahl – sowie in zunehmendem Maße auch aus GFK hergestellt und mit der Konstruktion über unterschiedlich aufwendige Befestigungen verbunden. Neben den Einwirkungen auf Rohrleitungen, wie z. B. erdbebeninduzierte Schwingungen können

von den Rohrleitungen auch besondere Lasten auf die Konstruktion wirken, insbesondere wenn auch lokales Rohrleitungsversagen nicht ausgeschlossen werden kann.

Speicherbecken

Speicherbecken sind typische Bauwerke der Wasserkrafttechnologie: Sie dienen der Speicherung von Wasser zur bedarfsgerechten Elektrizitätserzeugung. Speicherbecken werden meist unter möglichst weitreichender Ausnutzung geographischer Gegebenheiten geplant und ausgeführt. Die eigentlichen baulichen Maßnahmen beschränken sich dann auf die Einlaufbauwerke und geografieabhängige Ergänzungen, um ein möglichst großes Speichervolumen sicherzustellen.

Wehr- und Sperrenbauwerke (Laufwasserkraftwerke, Gezeitenkraftwerke)

Auch Wehr- und Sperrenbauwerke sind Elemente der Wasserkrafttechnologie.

Die Wehrbauwerke werden vom anströmenden Wasser senkrecht als Plattentragwerke belastet. Sie durchqueren meistens einen Flussquerschnitt und dienen zur Retention, Dosierung oder Umleitung von Wasser.

Die platten- oder schalenartigen Sperrenbauwerke dienen vorwiegend zur Wasserspeicherung. Durch die Talsperren wird ein gesamtes Tal abgesperrt. Die Höhe der Talsperre wird durch das Volumen des gewünschten Stauraums bzw. des zu speichernden Wasservolumens bestimmt. Die wesentlichen Bedingungen bei der Errichtung einer Talsperre sind die geotechnischen, geografischen und geologischen Gegebenheiten, die Tragfähigkeit, die innere und äußere Standsicherheit und die Dichtigkeit.

Die Staumauern gliedern sich in

- Gewichtstaumauern, die den Wasserdruck aus dem Staubecken durch ihr Eigengewicht aufnehmen (Bild 11),
- Bogenstaumauern, die den Wasserdruck zum überwiegenden Teil über Gewölbewirkung auf die seitlichen Flanken und auf den Untergrund abtragen (Bild 12) und
- aufgelöste Staumauern, die ohne Abstützung auf die Hänge durch besondere konstruktive Gestaltung der Stauwand die Wasserdruckkräfte mit verringerten aber höher ausgenutzten Betonmassen auf den Untergrund übertragen.

Zwischen den genannten Formen gibt es Übergangsformen, wie z.B. Bogengewichtstaumauern (Bild 13) oder Bogenmauern mit aufgesetzter Gewichtsmauer. Gewichtstaumauern gehören zu den größten erforderlichen Betonkubaturen.

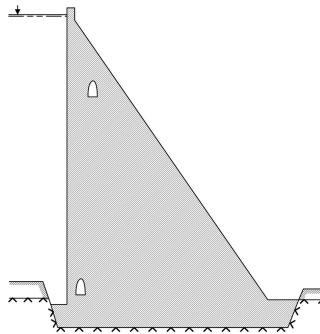


Bild 11. Gewichtstaumauer

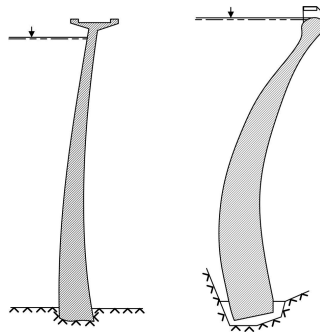


Bild 12. Bogenstaumauer

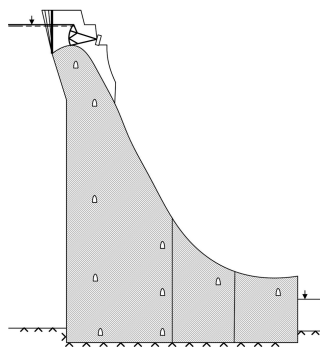


Bild 13. Bogengewichtstaumauer

Staudämme werden nach Art der verwendeten Dichtungsmaterialien als Dämme mit natürlicher Dichtung und Dämme mit künstlicher Dichtung unterschieden.

8 Einwirkungen

Die Palette der bei der Berechnung von Kraftwerksbauten zu berücksichtigenden Einwirkungen reicht von mechanischen Einwirkungen aller Art und Temperaturbeanspruchungen bis hin zu Strahlungseinwirkung:

- übliche Einwirkungen
Eigengewicht, Wind, Schnee, Verkehr, etc.
- besondere Einwirkungen infolge Betriebs
Strahlung, maschineninduzierte Schwingungen, Druckstöße, Berstdruckwellen, Temperatur, etc.
- besondere Einwirkungen von außen
Vandalismus, Terrorismus, Flugzeugabsturz, Erdbeben, Anpralllasten, etc.

Die „üblichen“ Einwirkungen sind den bekannten Regelwerken, insbesondere der DIN-1055-Reihe zu entnehmen, die besonderen Einwirkungen sind in speziellen Empfehlungen und Festlegungen, z. B. für kerntechnische Anlagen die „KTA-Sachstandsberichten, zusammengefasst.

9 Literatur

- [1] DLR Leitstudie 2009.
- [2] Petermann, J.: Sichere Energie im 21. Jahrhundert. Hoffmann und Campe, Hamburg 2006.
- [3] Der Fischer Weltalmanach. Fischer, Frankfurt, 2007.
- [4] Buchal, Ch.: Energie. Wilhelm und Else Heraeus Stiftung, Hanau, 2007.

- [5] Was Erneuerbare Energien leisten können. Agentur für Erneuerbare Energien, Berlin, 2010.
- [6] Tzscheutschler, P. et al: Energieverbrauch in Deutschland. In: BWK Nr. 6 2009, S. 6 ff.

Beiträge im Beton-Kalender

- [7] Bergmeister, K.: Betonmasten. In: Beton-Kalender 2006, Teil 1, S. 57–102.
- [8] Grünberg, J.; Funke, G.; Stavesand, J.; Göhlmann, J.: Fernmeldetürme und Windenergieanlagen in Massivbauweise. In: Beton-Kalender 2006, Teil 1, S. 103–223.
- [9] Noakowski, P.; Breddermann, M.; Harling, A.; Rost, M.: Turmartige Industriebauwerke. In: Beton-Kalender 2006, Teil 1, S. 223–318.
- [10] Niemann, H.-J.: Windlasten für turmartige Bauwerke nach DIN 1055-4 Neu. In: Beton-Kalender 2006, Teil 1, S. 363–406.
- [11] Katzenbach, R.; Boled-Mekasha, G.; Wachter, St.: Gründung turmartiger Bauwerke. In: Beton-Kalender 2006, Teil 1, S. 407–468.
- [12] Motzko, Ch.: Baubetriebliche Aspekte beim Bau turmartiger Bauwerke. In: Beton-Kalender 2006, Teil 1, S. 469–517.
- [13] Krätzig, W. B.; Harte, R.; Lohaus, L.; Wittek, U.: Naturzugkühltürme. In: Beton-Kalender 2007, Teil 2, S. 231–322.
- [14] Bergmeister, K.; Suda, J.; Hübl, J.; Rudolf-Miklau, F.: Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. In: Beton-Kalender 2008, Teil 2, S. 91–289.
- [15] Ebeling, K.; Lohmeyer, G.: Weiße Wannen im Hochbau. In: Beton-Kalender 2010, Teil 2, S. 137–191.

